

prof. dr hab. inż. Andrzej Barbacki¹⁾, dr inż. Jarosław Samolczyk²⁾

¹⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Poznań, ²⁾ Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

CHARAKTERYSTYKA STANU STRUKTURALNEGO STALI NISKOWĘGLOWEJ PODDANEJ ODKSZTAŁCENIU W ZAKRESIE MINIMUM OPORU PLASTYCZNEGO

Streszczenie

Przeprowadzono badania stali niskowęglowej (żelazo Armco) poddanej odkształceniu na ciepło w zakresie minimum oporu plastycznego. Minimum to stwierdzono w zakresie 825-850°C, natomiast podwyższenie temperatury odkształcenia do 900°C, w której ferryt już praktycznie nie występuje i stal posiada strukturę austenityczną, zwiększa opór plastyczny. Minimum oporu plastycznego przypada na temperatury odkształcenia, przy których zachodzi niemal pełna rekrytalizacja dynamiczna, zaś ilość austenitu w temperaturze odkształcenia nie jest na tyle duża, by znacząco wpłynąć na naprężenie uplastyczniające. Badania wykazały, że odkształcenie w zakresie minimum oporu plastycznego łączy się z wyraźnym rozdrobieniem ziaren spowodowanym dynamiczną rekrytalizacją.

Słowa kluczowe: stal niskowęglowa, odkształcenie na ciepło, opór plastyczny, rekrytalizacja dynamiczna

1. Wprowadzenie

Celem wykonanych prac było zbadanie minimum oporu plastycznego σ_p , którego istnienie ujawniły wcześniejsze publikacje [1,2] dotyczące stali obrabianych plastycznie na ciepło (półgorąco), a więc w sposób zapewniający jedynie częściową rekonstrukcję struktury i własności w porównaniu do stanu nieodkształconego. Zakres temperaturowy obróbki na ciepło mieści się zazwyczaj w przedziale pomiędzy 0,3 a 0,6 temperatury topnienia w skali Kelvin'a.

Obróbka plastyczna na ciepło stosowana jest od wielu lat, również w Polsce. Warto tu przypomnieć chociażby badania zrealizowane w latach 80. pod kierunkiem prof. Z. Marciniaka, m.in. w ramach problemu węzłowego 05.1.1.13.01. Większość wówczas zrealizowanych prac dotyczyła konkretnych problemów technologicznych. W kilku artykułach zajęto się analizą naprężenia uplastyczniającego dla różnych

stali przy różnych warunkach odkształcenia [3,4].

Od kilku lat zaobserwować można zwiększone zainteresowanie tematyką odkształcenia na ciepło. Prowadzone badania zmierzają do bliższego poznania zachodzących procesów i tym samym stworzenia podstaw do optymalizacji tej technologii. Najważniejszymi celami do osiągnięcia są:

- oszczędność energii niezbędnej do nagrzania materiału oraz zmniejszenie jego utleniania, w porównaniu z obróbką na gorąco;
- uzyskanie optymalnej mikrostruktury i własności mechanicznych;
- zmniejszenie oporu plastycznego, w porównaniu z obróbką na zimno.

Zagadnienie optymalizacji mikrostruktury i własności mechanicznych jest złożone, gdyż wpływa na nie szereg czynników, w tym: skład chemiczny stali, temperatura i wielkość odkształcenia, a także prędkość odkształcenia. Istotą problemu jest dokład-

ne poznanie zmian zachodzących w morfologii, wielkości ziaren i rozmieszczeniu poszczególnych faz.

Stwierdzono [5-8], że obróbka plastyczna na ciepło stwarza możliwości uzyskania drobnego, a nawet bardzo drobnego ziarna, odpowiadającego materiałom mikrokrystalicznym, oraz skutecznego kształtowania własności mechanicznych.

Procesami, które o tym decydują, są:

- zdrowienie i rekrytalizacja ferrytu lub austenitu, szczególnie w ich dynamicznej (ciągłej) postaci [5, 9-13]; w niższych temperaturach odkształcenia istotną rolę może odegrać dynamiczne zdrowienie;
- koalescencja i koagulacja cząstek cementytu lub innych węglików, przyspieszone odkształceniem plastycznym [14].

Jest oczywiste, że podwyższanie temperatury odkształcania prowadzi do obniżenia oporu plastycznego [1,2,15]. Informacje na temat oporu plastycznego przy różnych prędkościach odkształcenia stali o zróżnicowanej zawartości węgla można znaleźć w pracach Niechajowicza [16] i Xinbo [17]. Nie ujawniono w nich jednakże minimum oporu plastycznego występującego tuż poniżej temperatury A_3 dla stali niskowęglowych i w okolicy temperatury A_1 dla stali o znacznej zawartości perlitu [1,2]. Analizie stanu strukturalnego towarzyszącemu temu minimum, na przykładzie stali niskowęglowej, poświęcono niniejszy artykuł.

2. Materiał i metody badań

Do badań użyto stali niestopowej E04J o składzie chemicznym podanym w tabelicy 1.

Tablica 1
Skład chemiczny badanej stali

Zawartość wagowa %				
C	Si	Mn	P	S
0,029	0,022	0,156	0,012	0,018
Cr	Cu	Mo	Ni	Al
0,018	0,039	0,003	0,015	0,045

Odształcenie plastyczne osiągnięto spęczając próbki Rastigajewa o wymiarach $\varnothing 14 \times 14$ mm i na tej podstawie wyznaczono krzywe naprężenie uplastyczniające–temperatura odkształcenia, oraz za pomocą symulatora procesów technologicznych GLEEBLE 3800 na próbkach $\varnothing 10 \times 12$ mm, przeznaczonych do badań mikrostruktury. Symulator GLEEBLE 3800 zapewnia szybkość chłodzenia rzędu 1000 K/s, co gwarantuje praktyczną niezmienną strukturę w trakcie chłodzenia po odkształceniu.

Przyjęto wielkość odkształcenia $\varepsilon = 1.0$ i prędkość odkształcenia $\dot{\varepsilon} = 0,21 \text{ s}^{-1}$.

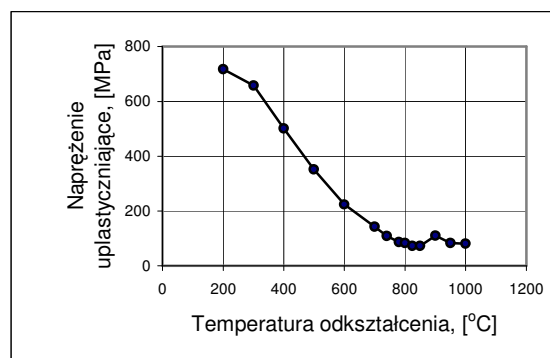
Temperatury odkształcenia do badań mikrostruktury wybrano w oparciu o uzyskane krzywe umocnienia.

Badania metodą mikroskopii świetlnej oraz elektronowej skaningowej wykonano na zglądach równoległych do osi próbki, trawionych 3% nitałem. Na mikroskopie skaningowym (Vega Tescan 5135), wyposażonym w odpowiedni program komputerowy, przeprowadzono pomiary wielkości ziarna i współczynnika wydłużenia ziarna Feret'a.

Elektronowe badania transmisyjne (TEM) przeprowadzono za pomocą mikroskopu Philips EM300 na foliach wyciętych równoległe do kierunku płynięcia materiału przy ściskaniu.

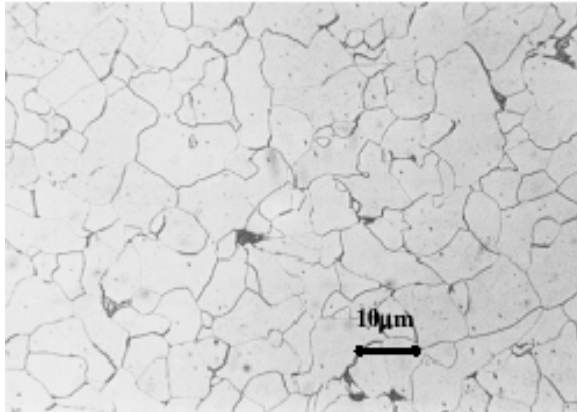
3. Wyniki

Wyniki badań naprężenia uplastyczniającego, zmieniającego się wraz z temperaturą pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Wpływ temperatury odkształcenia na opór plastyczny stali E04J. Odkształcenie logarytmiczne $\varepsilon = 1,0$

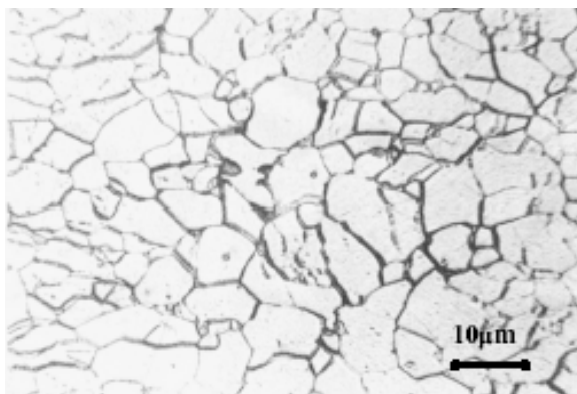
Badania mikrostruktury za pomocą mikroskopu metalograficznego pozwoliły prześledzić jej ewolucję wraz z temperaturą odkształcenia. Ilustrują to rysunki 2-5. W stanie wyjściowym badana stal posiadała strukturę ferrytyczną ze śladami perlitu (rys. 2).



Rys. 2. Mikrostruktura badanej stali w stanie wyjściowym

Odształcenie w temperaturach wyraźnie niższych od temperatury minimum oporu plastycznego (580-750 °C) daje struktury niejednorodne, składające się z ziaren zgniecionych w wyniku odkształcenia oraz ziaren będących już na etapie zdrowienia lub rekrytalizacji.

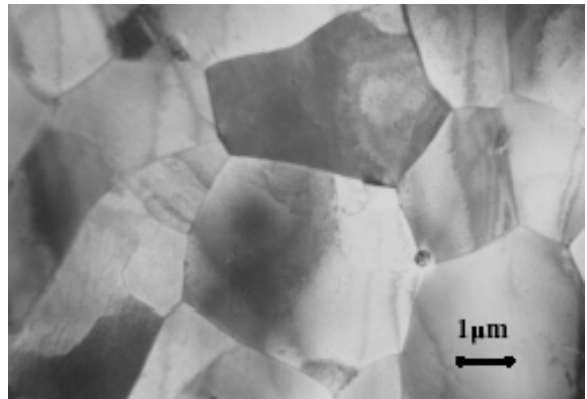
Rezultatem odkształcenia w temperaturze minimum oporu plastycznego (850 °C) jest zrekrystalizowana, drobnoziarnista struktura ferrytyczna (rys. 3).



Rys. 3. Mikrostruktura po odkształceniu w temperaturze minimum oporu plastycznego (850 °C)

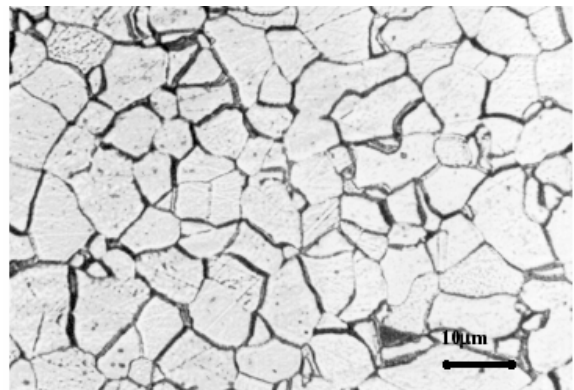
Badania za pomocą TEM całkowicie potwierdziły tę ocenę, ujawniając zrekrystalizowaną strukturę ferrytyczną, jednak odbiegającą nieco od stanu równowagi.

Wskazuje na to zróżnicowana wielkość i kształt obserwowanych ziaren (rys. 4).



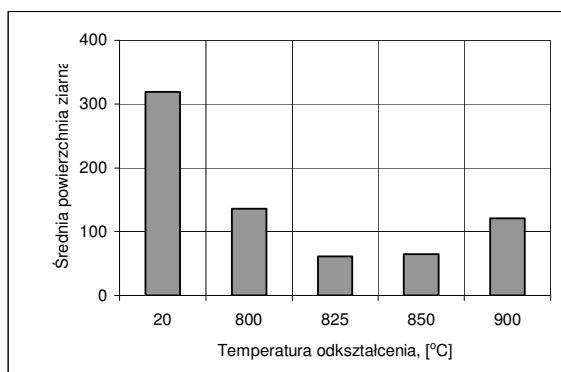
Rys. 4. Mikrostruktura po odkształceniu w temperaturze minimum oporu plastycznego (TEM)

Obserwacje mikrostruktur uzyskanych po odkształceniu w temperaturze wyższej od temperatury przemiany $\alpha \rightarrow \gamma$ wykazały, zgodnie z przewidywaniami, strukturę zbliżoną w charakterze do struktur: w stanie wyjściowym i po odkształceniu w temperaturze minimum oporu plastycznego (rys. 5).

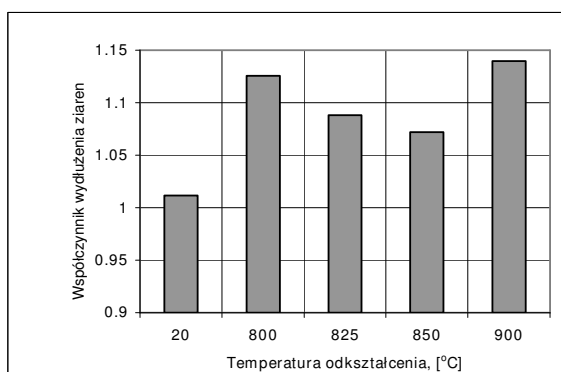


Rys. 5. Mikrostruktura stali E04J po odkształceniu w temperaturze 900 °C

Wymienione mikrostruktury różnią się wielkością i kształtem ziarna. Potwierdziły to badania ilościowe. Wyniki pomiarów średniej powierzchni i współczynnika wydłużenia ziaren Feret'a przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Zmiana średniej powierzchni ziarna wraz z temperaturą odkształcenia



Rys. 7. Wpływ temperatury odkształcenia na współczynnik kształtu ziaren Feret'a

Uznanym wskaźnikiem charakteryzującym warunki odkształcenia, a tym samym jego skutki, jest parametr Zenera-Hollomona:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

gdzie:

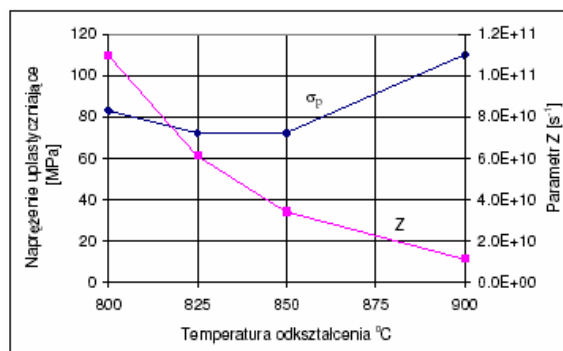
$\dot{\epsilon}$ - prędkość odkształcenia rzeczywistego [s^{-1}],

Q - energia aktywacji [kJ/mol],

R - stała gazowa [kJ/molK],

T - temperatura [K].

Wielkość tego parametru wyznaczono dla temperatur odkształcenia 800-900 °C i wraz ze zmierzonym dla tych temperatur naprężeniem uplastyczniającym przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Wpływ temperatury odkształcenia na parametr Zenera-Hollomona zestawiony z pomiarami naprężenia uplastyczniającego

4. Dyskusja wyników

Krzywa umocnienia stali E04J (rys. 1) ujawnia wyraźne minimum w temperaturach 825-850 °C. Przyczyną pojawienia się tego minimum jest zachodząca w tych temperaturach dynamiczna rekrytalizacja, przede wszystkim ferrytu, będącego dominującym składnikiem struktury badanej stali. Dowodem tego są zdjęcia, zarówno z mikroskopu świetlnego (rys. 3), jak i elektronowego (rys. 4), na których widać ziarna ferrytu o kształcie zbliżonym do równoosiowego. Potwierdzają to pomiary współczynnika wydłużenia ziarna Feret'a (rys. 7), który dla tych temperatur odkształcenia przyjmuje wartość bliską jedności.

Również wyznaczone wartości parametru Zenera-Hollomona (rys. 8) wskazują na to, iż warunki odkształcenia gwarantują możliwość wystąpienia rekrytalizacji dynamicznej. Wynika to z warunku podanego przez Tsuji [18]: $Z \leq 10^{11} \text{ s}^{-1}$.

Wzrost oporu plastycznego w zakresie temperatur 850-900 °C wiąże się z uzyskaniem przez stal struktury austenitycznej, charakteryzującej się większym współczynnikiem umocnienia.

Pomiary wielkości ziarna wykazały jego rozdrobnienie w zakresie minimum oporu plastycznego, widoczne zarówno przy obserwacji zamieszczonych zdjęć mikrostruktury (rys. 2, 3, 5), jak również potwierdzone metodą metalografii ilościowej (rys. 7). Decyduje o tym nasilający się (w porównaniu z odkształceniem w temperaturze 800 °C) proces dynamicznej rekrytalizacji. Wskazuje to, iż proces rekrytalizacji jest skutecznym mechanizmem rozdrobnienia ziarn

na, co pozwala na uzyskanie nawet struktur ultra-drobnziarnistych, pod warunkiem stosowania dostatecznie dużych odkształceń [8]. Z kolei zwiększenie temperatury odkształcenia do 900 °C prowadzi do uzyskania większego ziarna gdyż wpływ temperatury na rozrost ziarna staje się znaczący.

5. Wnioski

1. W niskowęglowej stali E04J (żelazo Armco) stwierdzono istnienie minimum oporu plastycznego w zakresie temperatur 825-850 °C.
2. Minimum oporu plastycznego łączy się z wyraźnym rozdrobnieniem ziarna będącym skutkiem dynamicznej rekrytalizacji.
3. Minimum oporu plastycznego przypada na temperaturę odkształcenia, przy której zachodzi niemal pełna rekrytalizacja, zaś ilość austenitu w temperaturze odkształcenia nie jest na tyle duża, by znacząco wpłynąć na opór plastyczny.
4. Podwyższenie temperatury odkształcenia do 900 °C, w której ferryt praktycznie zanika i stal posiada strukturę austenityczną, zwiększa opór plastyczny.

Literatura

1. Samolczyk J., Zmniejszenie oporu plastycznego w stalach niestopowych odkształczanych na ciepło, Praca doktorska, Poznań, 2003.
2. Samolczyk J., Barbacki A., Wpływ zawartości węgla na naprężenie uplastyczniające i mikrostrukturę niestopowych stali odkształczonych na ciepło, *Obróbka Plastyczna Metali*, 16(2005), 5-14.
3. Marciniak Z., Konieczny A., Analysis of multi-stage deformation within the warm-forming temperature range, *Annals of the CIRP*, 21(1980), 185-188.
4. Milczarek E., Plastyczne własności stali w temperaturze obróbki na półgorąco, *Mechanik*, 60(1987), 63-64.
5. Murty N.S.V.S. et al., Dynamic recrystallization of ferrite during warm deformation of ultrafine grained ultra-low

- carbon steel, *Scripta Mater.*, 53(2005), 763-768.
6. Murty N.S.V.S. et al., Classification of microstructural evolution during large strain high Z deformation of a 0.5 carbon steel, *Scripta Mater.*, 52(2005), 713-718.
7. Ohmori A. et al., Effect of deformation temperature and strain rate on evolution of ultrafine grained structure through single-pass large-strain warm deformation in a low carbon steel, *Mat. Trans.*, 45(2004), 2224-2231.
8. Sellars C.M., *Metals Forum*, 4, (1981), 75.
9. Bourell D.L., Grain boundary strengthening of warm-rolled metals, *Res Mechanica Letters*, 19(1981), 417-421.
10. McQueen H.J., *Mater. Sci. Eng. A*, 101(1988), 149.
11. Tsuji N., Matsubara Y., Saito Y., Dynamic recrystallization of ferrite in interstitial free steel, *Acta Metall.*, 37(1997), 477-484.
12. Strojeva L. et al., Development of microstructure and texture of medium carbon steel during heavy warm deformation, *Acta Materialia*, 52(2004), 2209-2220.
13. Herman G. et al., Microstructures of ferritic warm rolled plain carbon steels, *Ultrafine Grained Materials III*, 2004, 357-362.
14. Liu M. et al., A submicron mild steel produced by simple warm deformation, *Mater. Sci. Eng. A*, 325(2002), 101-106.
15. Sellars C.M., Mc Tegart W.J., Hot workability, *Intern. Metallurgical Reviews*, 158, 17(1972), 1-22.
16. Niechajowicz A., Tobota A., Warm deformation of carbon steel, *J. Mater. Proc. Tech.*, 106(2000), 123-130.
17. Xinbo L. et al., J. Research on flow stress characteristics of AISI 1006 and AISI 5140 in the temperature range of warm forging by means of thermo-mechanical experiments, *Mater. Proc. Tech.*, 122(2002), 38-44.
18. Tsuji N., Saito Y., Maki T, 4-th International Conference on Recrystallization and Related Phenomena, Japan Inst. of Metals, 1999, 253-258.

MICROSTRUCTURE CHARACTERIZATION OF THE LOW CARBON STEEL DEFORMED IN THE RANGE OF DEFORMATION RESISTANCE MINIMUM

Abstract

The low carbon steel (Armco iron) warm-worked in the range of deformation resistance minimum has been investigated. The minimum was found in the temperature range of 825 - 850°C, however, rising the deformation temperature up to 900 °C when ferrite practically disappears, leads to deformation resistance increase. It has been shown that deformation in the range of deformation resistance results in grain refinement due to dynamic recrystallization. Deformation resistance minimum appears when the steel is deformed in the temperature range leading to practically complete dynamic recrystallization and there is not enough austenite to increase significantly the plastic stress.

Key words: low carbon steel, warm working, deformation resistance, dynamic recrystallization